干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究

杨晓霞， 赵锦梅， 张 雪， 樊宇航， 张 斌， 王婧楠， 张碧艳

（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 为探讨高寒地区灌丛枯落物层及土壤层的水源涵养功能，以祁连山东段6种典型灌丛的枯落物和土壤为研究对象，采用野外调查与室内浸泡相结合的方法，对枯落物及土壤水文特征进行了研究。结果表明：(1) 6种灌丛枯落物的蓄积量范围为0.23~3.61 t·hm^{-2}，大小排序为山生柳>硬叶柳>绣线菊>金露梅>头花杜鹃>千里香杜鹃。(2) 枯落物最大持水量范围为0.57~10.59 t·hm^{-2}，山生柳最大，千里香杜鹃最小；最大持水率变化范围为147.30%~293.28%，山生柳最大，绣线菊最小。(3) 6种灌丛枯落物的持水量(Y)与浸泡时间(t)符合对数函数关系：$Y=k\ln t+b$，$R^2>0.967$；吸水速率(V)与浸泡时间(t)符合幂函数关系：$V=Kt^n$，$R^2>0.823$。(4) 最大拦蓄量和有效拦蓄量均为山生柳>硬叶柳>金露梅>绣线菊>千里香杜鹃>头花杜鹃。(5) 6种灌丛土壤容重范围为0.69~0.95 g·cm^{-3}，山生柳最大，千里香杜鹃最小；土壤总孔隙度范围为60.94%~68.75%，千里香杜鹃最大，绣线菊最小；土壤最大持水量范围为609.44~687.46 t·hm^{-2}，千里香杜鹃最大，绣线菊最小。(6) 根据坐标综合评定法分析得出，山生柳灌丛的水源涵养功能最优。

关 键 词： 灌丛；枯落物；土壤；水文特征；高寒地区

文章编号：

森林作为陆地生态系统的重要组成部分，其水源涵养功能是评估生态服务和功能价值的关键指标[1]，具有拦蓄洪水、调节径流、净化水质、促进全球水文循环、维持水量平衡等作用[2-3]。森林通过林冠层的截留、枯落物层吸持水，土壤层的蓄水等作用发挥水源涵养功能，蓄水保水能力的主体部分体现在枯落物层和土壤层，二者的持水量达到森林总涵养水量的85%[1,4]，也是监测森林生态系统健康与否的重要环节[5-6]。枯落物在土壤表面的覆盖，能够使外界环境对土壤和地面植被的冲击大大减弱[7]，使其免受雨滴打击，起到保护土壤的作用，也能防止土壤水分蒸发、增加土壤水分入渗、减缓地表径流等[8-11]。同时，枯落物是微生物能量和土壤养分的重要来源，通过分解增加土壤的孔隙度及腐殖质含量，改良土壤性状。土壤作为森林水文效应的第三作用层，是水分和养分的调节器与储存库，森林土壤水分调控着大气-植物-土壤3个界面之间物质和能量的相互交换，对土壤水分入渗、林地蒸散和流域产流有直接影响[12]，大气降水通过土壤孔隙的贮藏与调节供应植物蒸腾、地表蒸发、水分交换，从而体现水源涵养功能。因此，对于枯落物和土壤水文特征的研究，有助于加深对森林生态系统水源涵养功能等机制和规律的认识。

祁连山位于青藏高原、蒙新高原和黄土高原的交界带[13]，是西北地区重要的水源涵养区，该地区地理位置特殊、海拔梯度高，自然环境独特、水系分布广、植被种类丰富，其强大的水源涵养功能对青藏高原东北部乃至整个河西绿洲的社会、经济、生态安全均发挥着至关重要的作用[14]。为此，专家学者对祁连山区的森林水文效应进行了大量研究，内容

收稿日期： 2021-04-14； **修订日期：** 2021-06-09
基金项目： 甘肃省科技计划自然科学基金项目(20JR10RA533)资助
作者简介： 杨晓霞(1995-)，女，硕士研究生，主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究. E-mail: 1450404710@qq.com
通讯作者： 赵锦梅(1978-)，女，教授，博士，主要从事水土保持及生态水文等方面的研究. E-mail: zhaojm@gsau.edu.cn

涉及森林对降水的截留[15]、林冠层生态水文效应[16]、枯落物的水文效应[17-18]、土壤水分变化规律[19-20]、森林对径流和洪峰调节[21]等方面。从研究的目标树种来看，大多均集中在青海云杉等乔木树种[16,22-23]。高寒地区独特的气候及地理位置，使得祁连山灌木林分布面积大，占祁连山区林业用地面积的67.32%[17]，涵蓄水总量在3×10^8 m^{3}以上[24]，灌木林对于当地生态平衡的维持及水文的调节发挥着不可取代的作用，因此，很有必要明确该地区灌木林发挥的水源涵养效应。为此本文选取了祁连山东段金强河河谷山生柳（*Salix oritrepha*）、硬叶柳（*Salix sclerophylla*）、绣线菊（*Spiraea salicifolia*）、头花杜鹃（*Rhododendron capitatum*）、千里香杜鹃（*Rhododendron thymifolium*）、金露梅（*Potentilla fruticosa*）6种典型灌丛，探讨该地区灌丛枯落物及土壤的水文特性，以期为祁连山高寒地区灌丛水源涵养功能的恢复与提升以及该地区的植被建设提供理论指导。

1　研究区概况

研究区位于祁连山东段的天祝金强河河谷（102°29′~102°33′E，37°11′~37°13′N），海拔为2955~3500 m。属大陆性高原季风气候，紫外线辐射强，气候寒冷潮湿，年平均气温为-0.1 ℃，最冷月1月的平均气温为-18.3 ℃，最热月7月的平均气温为12.7 ℃，年积温为1380 ℃左右，气温变化大，水热同期，无绝对无霜期，仅分冷、热两季（6~9月为热季，冷季长达到7个月以上）。年日照时间、年蒸发量、年降水量分别为2663 h、1592 mm、476 mm，通常7~9月为降雨集中期，10月到次年4月为下雪期，阴坡灌丛下方覆盖有苔藓层。土层厚度在40~80 cm左右，pH值在7.0~8.2之间。从河漫滩到阶地再到高山，土壤依次为亚高山草甸土、亚高山黑钙土、亚高山栗钙土、亚高山灌丛草甸土和高山灌丛草甸土[20]。

2　研究方法

2.1　样地设置与调查

2020年10月，在祁连山东段金强河河谷选取海拔相对一致的山生柳、硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅灌丛，每类灌丛各设置3个10 m×10 m的样方，对样方内灌丛的基本特征进行调查（表1）。

2.2　枯落物收集及土壤样品采集

在每个样方内随机布设3个50 cm×50 cm的小样方收集地表枯落物，称鲜质量后带回实验室烘干备用。在收集完的对应处挖土壤剖面，用容积为100 cm^{3}环刀分别采集0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层土样，每层3次重复。

2.3　枯落物水文特征的测定与计算

取烘干的枯落物样品各20 g装入大小统一的100目尼龙袋内浸没于清水中，分别在浸泡0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、24 h捞起枯落物，静置至无水滴滴落时用精度0.01 g的电子天平称枯落物湿重，每种枯落物设定3个重复。枯落物持水性能指标按以下公式进行计算[17]。

$$K_z = \left(G_{鲜} - G_{干}\right)/G_{干} \times 100\% \tag{1}$$

$$G_c = G_{干} \times 0.04\ \mathrm{t \cdot hm^{-2}} \tag{2}$$

$$G_h = G_{浸} - G_{干} \tag{3}$$

$$G_{h\max} = G_{24} - G_{干} \tag{4}$$

$$K_h = \left(G_{浸} - G_{干}\right)/G_{干} \times 100\% \tag{5}$$

$$K_{h\max} = \left(G_{24} - G_{干}\right)/G_{干} \times 100\% \tag{6}$$

$$G_{拦} = \left(0.85K_{h\max} - K_z\right) \times G_c \tag{7}$$

$$K_{拦} = 0.85K_{h\max} - K_z \tag{8}$$

$$G_{拦\max} = K_{拦\max} \times G_c/100\% \tag{9}$$

$$K_{拦\max} = K_{h\max} - K_z \tag{10}$$

表1　样地基本概况

Tab. 1　Basic situation of sample plots

灌丛类型	经度/E	纬度/N	坡向	海拔/m	坡度/(°)	平均冠幅/cm	平均树高/cm	平均基径/mm	平均株数/株	枯落物厚度/cm
山生柳	102°57′	37°25′	阳坡	3237.70~3241.36	6	172.81	127.91	12.02	57	3.33
硬叶柳	102°57′	37°25′	阳坡	3237.70~3241.36	6	119.17	86.20	7.65	60	2.00
绣线菊	102°57′	37°25′	阳坡	3237.70~3241.36	6	69.38	69.31	6.06	21	0.70
头花杜鹃	102°56′	37°24′	阴坡	3231.21~3232.61	16	61.94	60.62	5.94	46	0.75
千里香杜鹃	102°56′	37°24′	阴坡	3231.21~3232.61	16	55.00	56.33	5.66	47	0.40
金露梅	102°57′	37°25′	阴坡	3231.21~3232.61	16	83.90	63.00	4.32	43	1.10

式中：$G_{鲜}$、$G_{干}$、$G_{浸}$、G_{24}分别表示枯落物的鲜重、干重、浸泡对应时间重量、浸泡24 h后重量(g)；G_c、G_h、$G_{h\,max}$、$G_{拦}$、$G_{拦\,max}$分别表示枯落物蓄积量、持水量、最大持水量、有效拦蓄量、最大拦蓄量($t \cdot hm^{-2}$)；K_z、K_h、$K_{h\,max}$、$K_{拦}$、$K_{拦\,max}$分别表示枯落物自然含水率、持水率、最大持水率、有效拦蓄率、最大拦蓄率(%)；枯落物蓄积量计算公式中因小样方边长为50 cm×50 cm，面积即为2500 cm^2，由1 g·2500 cm^{-2}换算为0.04 $t \cdot hm^{-2}$。

2.4 土壤水文特征的测定与计算

采用环刀法测量土壤的容重和孔隙度等，土壤持水性能按以下公式进行计算[12]。

$$W_{max} = 10000 P_z h \tag{11}$$

$$W_m = 10000 P_m h \tag{12}$$

$$W_{min} = 10000 P_f h \tag{13}$$

式中：W_{max}、W_m、W_{min}分别为土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量($t \cdot hm^{-2}$)；P_z、P_m、P_f分别为土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度(%)；h为土壤厚度(m)。本研究持水量计算土壤厚度取10 cm。

2.5 水源涵养功能的量化

参照陈引珍等的坐标综合评定法[25]，对不同灌丛枯落物和土壤进行水源涵养功能综合评价，即用a_{ij}表示原始数据，i表示不同灌丛，j表示不同指标。用m_j表示每一个a_{ij}的最大值。对a_{ij}和m_j进行比较，组成相对值$d_{ij}(a_{ij}/m_j)$的“矩阵坐标”。根据以下公式计算P_i、$\sum P_i^2$，最后，每种灌丛类型的$\sum P_i^2$值由小到大进行排序，综合值越小水源涵养功能越优。

$$P_i = \sqrt{(1 - d_{ij})^2} \tag{15}$$

$$\sum P_i^2 = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + P_5^2 \tag{16}$$

式中：P_i为指标的量化值；d_{ij}为(a_{ij}/m_j)相对值；$\sum P_i^2$表示灌丛水源涵养功能的综合表现；P_1^2表示枯落物厚度量化值；P_2^2表示枯落物蓄积量量化值；P_3^2表示枯落物最大持水量量化值；P_4^2表示枯落物有效拦蓄量量化值；P_5^2表示土壤的蓄水能力(非毛管孔隙度)量化值。

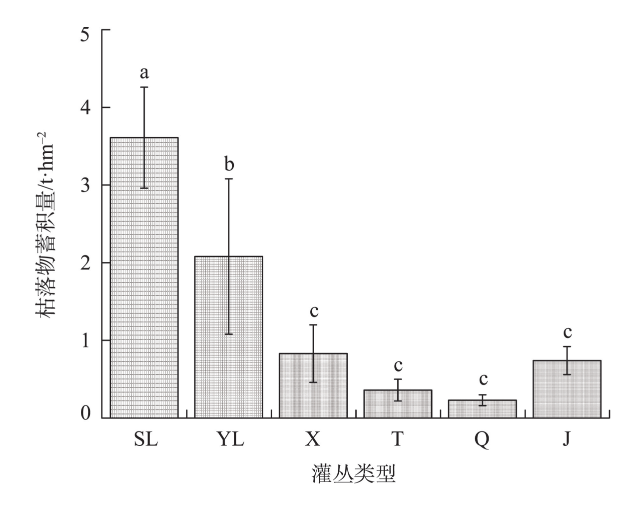
2.6 数据分析处理

采用Microsoft Excel、SPSS 24.0对数据进行统计分析，用Origin 2018绘图，采用单因素方差分析和最小显著法检验组间差异性，通过多元回归分析进行函数拟合。

3 结果与分析

3.1 灌丛枯落物水文特征

3.1.1 *枯落物蓄积量* 由图1可知，6种灌丛枯落物蓄积量范围为0.23~3.61 $t \cdot hm^{-2}$，山生柳灌丛枯落物蓄积量最大，为3.61 $t \cdot hm^{-2}$，显著高于其他灌丛($P<0.05$)。具体来看，山生柳枯落物蓄积量分别比硬叶柳、绣线菊、金露梅、头花杜鹃、千里香杜鹃多了1.53 $t \cdot hm^{-2}$、2.78 $t \cdot hm^{-2}$、2.87 $t \cdot hm^{-2}$、3.25 $t \cdot hm^{-2}$、3.38 $t \cdot hm^{-2}$，绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅4种灌丛枯落物蓄积量间无显著差异($P>0.05$)。



注：不同小写字母表示不同灌丛间差异显著，$P<0.05$；SL为山生柳，YL为硬叶柳，X为绣线菊，T为头花杜鹃，Q为千里香杜鹃，J为金露梅。下同。

图1 枯落物蓄积量

Fig. 1 Litter accumulation

3.1.2 *枯落物持水性能* 枯落物的持水量是森林水源涵养功能和水土保持能力的重要评价指标之一。由图2可知，在6种灌丛中头花杜鹃枯落物自然含水率显著最高(151.83%，$P<0.05$)，绣线菊最小(43.7%)，山生柳、硬叶柳、千里香杜鹃3个灌丛间及绣线菊和金露梅2个灌丛间的枯落物自然含水率无显著差异($P>0.05$)。由图3可知，山生柳灌丛枯落物最大持水量显著最高(10.59 $t \cdot hm^{-2}$)，分别是硬叶柳、金露梅、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃枯落物持水量的1.80、5.40、6.01、13.07、18.58倍，最大持水量在6种灌丛枯落物之间均存在显著差异($P<0.05$)。山生柳和硬叶柳枯落物的最大持水率显著高于金露梅、千里香杜鹃、头花杜鹃、绣线菊灌丛($P<0.05$)，最大持水率从大到小依次为山生柳

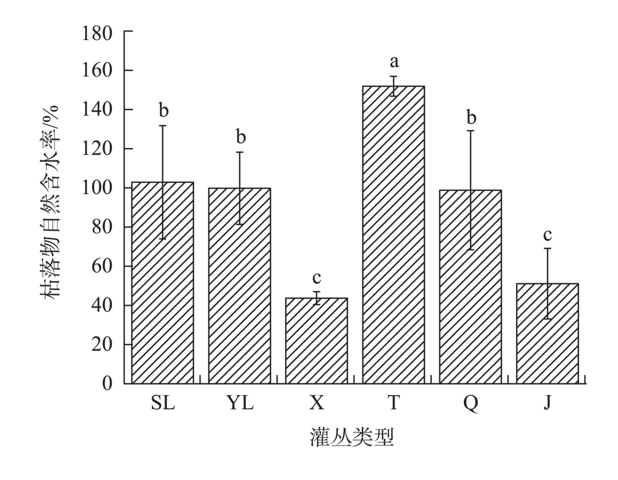


图2　枯落物自然含水率

Fig. 2　Natural moisture content of litter

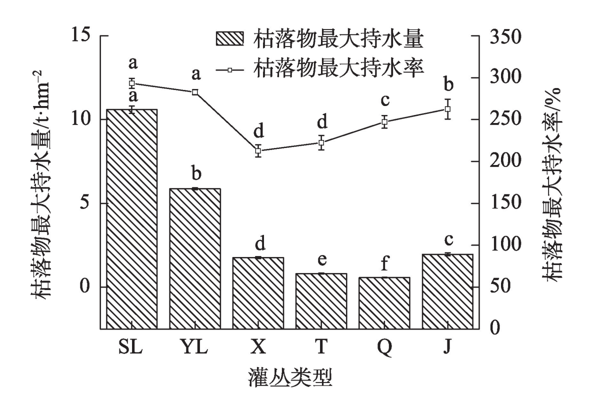


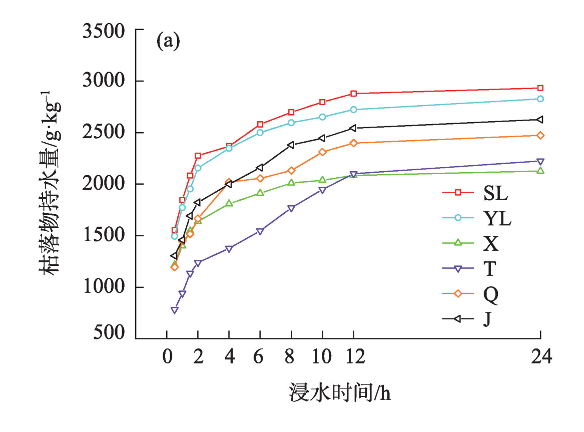
图3　枯落物最大持水量和最大持水率

Fig. 3　Maximum water holding capacity and maximum water holding rate of litter

(293.28%)、硬叶柳(282.75%)、金露梅(262.60%)、千里香杜鹃(247.30%)、头花杜鹃(222.50%)、绣线菊(212.65%)。

3.1.3　枯落物持水过程比较　6种灌丛枯落物的持水量随时间的延长而增大,吸水速率逐渐减小,当浸水时间超过12 h后,持水量逐渐趋于稳定(图4)。持水量的动态变化过程可以分为3个阶段:迅速吸水阶段:在0~2 h内,6种枯落物大量、迅速吸水,0.5 h内是吸水最快的阶段,0.5 h时吸水速率达到最大值,此时山生柳、硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅分别为:3104.33 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$、2988.67 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$、2430.33 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$、1565.33 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$、2389.00 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$、2610.00 $g\cdot kg^{-1}\cdot h^{-1}$。在0.5~2 h之间,枯落物持续吸水,但是增加幅度相对缓慢,吸水速率整体呈现迅速减小趋势。在浸水2 h时,山生柳、硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅的持水量分别达到最大持水量的77.62%、76.25%、77.00%、55.69%、67.36%、69.40%。缓慢吸水阶段:在4~12 h内,枯落物的持水量虽然在增加,但是增加的速率比较缓慢,远远低于0~2 h,在吸水12 h时,山生柳、硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅的持水量分别达到最大持水量的98.14%、96.32%、98.04%、94.41%、96.99%、96.86%,基本接近最大值。平稳吸水阶段:12 h后,枯落物持水量保持少量增加的状态,逐渐趋于稳定,吸水速率保持减小的趋势,并逐渐靠近0,枯落物持水基本饱和。枯落物的持水作用主要表现在降雨前期的前2 h以内,尤其是前0.5 h内。

对6种灌丛枯落物持水量、吸水速率分别与浸泡时间进行回归分析拟合(表2),均表现出较好的相关性,持水量(Y)与浸泡时间(t)的决定系数(R^2)均在0.967以上,两者拟合符合对数函数关系:$Y=k\ln t+b$;吸水速率(V)与浸泡时间(t)的决定系数(R^2)均在0.823以上,两者拟合符合幂函数关系:$V=Kt^n$。



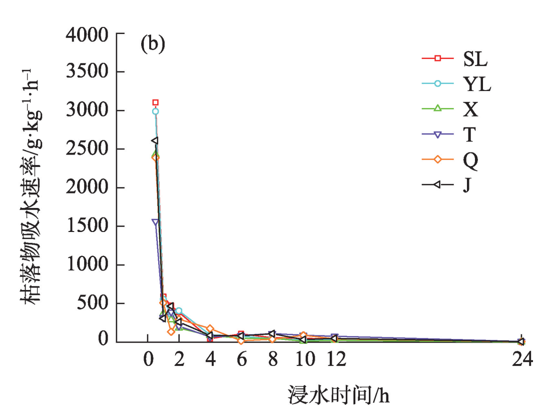


图4　枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系

Fig. 4　Relationship between water holding capacity, water absorption rate and soaking time of litter

表2 枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的回归拟合方程

Tab. 2 Regression fitting equations of water holding capacity, water absorption rate and soaking time of litter

灌丛类型	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
	拟合方程	决定系数(R^2)	拟合方程	决定系数(R^2)
山生柳	Y=371.603ln$t$+1894.645	0.971**	V=880.144$t^{-1.437}$	0.920**
硬叶柳	Y=358.237ln$t$+1813.809	0.980**	V=815.394$t^{-1.393}$	0.977**
绣线菊	Y=252.702ln$t$+1433.572	0.976**	V=609.293$t^{-1.485}$	0.956**
头花杜鹃	Y=396.161ln$t$+966.609	0.967**	V=520.498$t^{-0.997}$	0.853**
千里香杜鹃	Y=354.133ln$t$+1438.919	0.981**	V=585.315$t^{-1.270}$	0.823**
金露梅	Y=374.327ln$t$+1532.965	0.982**	V=687.293$t^{-1.257}$	0.906**

注：Y为持水量(g·kg^{-1})，V为吸水速率(g·kg^{-1}·h^{-1})，t为浸水时间(h)；*表示P<0.05，**表示P<0.01。

3.1.4 枯落物的拦蓄性能 由图5可知，山生柳灌丛枯落物最大拦蓄量最大，为6.88 t·hm^{-2}，显著高于其余5种灌丛(P<0.05)，头花杜鹃最小，为0.26 t·hm^{-2}，绣线菊、金露梅和头花杜鹃、千里香杜鹃的枯落物最大拦蓄量之间差异显著(P<0.05)。不同灌丛枯落物最大拦蓄率范围为70.67%~211.48%，金露梅灌丛枯落物最大拦蓄率最大，为211.48%，与其余5种灌丛差异显著(P<0.05)，山生柳和硬叶柳枯落物最大拦蓄率显著高于绣线菊、千里香杜鹃、头花杜鹃(P<0.05)。一般来说，枯落物的最大拦蓄量大于枯落物对降雨的实际拦蓄情况，因此，采用有效拦蓄量和有效拦蓄率来反映枯落物的实际拦蓄情况[8]。不同灌丛枯落物有效拦蓄量范围为0.14~5.29 t·hm^{-2}，山生柳灌丛枯落物的有效拦蓄量最大，为5.29 t·hm^{-2}，显著高于硬叶柳、金露梅、绣线菊、千里香杜鹃、头花杜鹃(P<0.05)，分别高出2.37 t·hm^{-2}、4.01 t·hm^{-2}、4.15 t·hm^{-2}、5.03 t·hm^{-2}、5.15 t·hm^{-2}。枯落物有效拦蓄率范围为37.29%~172.09%，金露梅枯落物有效拦蓄率显著大于其余5种(P<0.05)，分别是山生柳、硬叶柳、绣线菊、千里香杜鹃、头花杜鹃的1.17、1.22、1.26、1.54、4.61倍，从大到小依次为金露梅(172.09%)、山生柳(146.46%)、硬叶柳(140.57%)、绣线菊(137.05%)、千里香杜鹃(111.43%)、头花杜鹃(37.29%)，在千里香杜鹃和头花杜鹃之间枯落物有效拦蓄率差异显著(P<0.05)。

3.2 灌丛土壤水文特征

3.2.1 土壤容重及孔隙度 土壤容重是衡量森林土壤性质的重要指标之一，其大小与土壤持水能力息息相关。由表3可知，在0~60 cm土层中，千里香杜鹃灌丛土壤的容重(0.69 g·cm^{-3})显著低于其余5种灌丛(P<0.05)，说明千里香杜鹃土壤最疏松，山生柳土壤容重最大(0.95 g·cm^{-3})，山生柳、硬叶柳、绣线菊土壤容重显著高于金露梅、头花杜鹃、千里香杜鹃(P<0.05)，说明阳坡土壤较阴坡紧实。土壤的总孔隙度、毛管孔隙度均为千里香杜鹃最大、绣线菊最小，千里香杜鹃、头花杜鹃、金露梅土壤的总孔隙度和毛管孔隙度显著高于山生柳、硬叶柳、绣线菊(P<0.05)。6种灌丛土壤非毛管孔隙度之间无显著差异(P>0.05)，从大到小依次为硬叶柳(5.21%)、头花杜鹃(5.20%)、绣线菊(4.94%)、千里香杜鹃

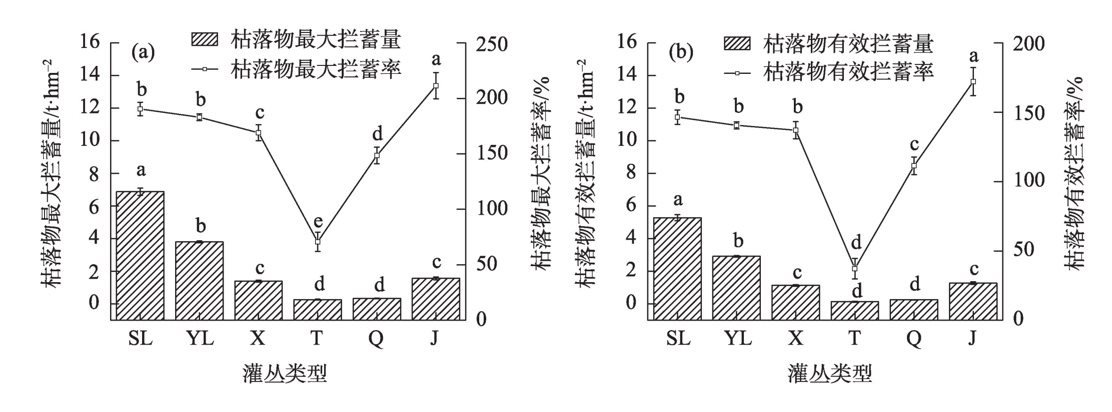


图5 枯落物拦蓄量与拦蓄率

Fig. 5 Storage capacity and storage rate of litter

(4.74%)、金露梅(4.34%)、山生柳(4.20%)。从土壤的垂直剖面来看，随着土层的向下延伸，容重逐渐增大，但山生柳、硬叶柳、绣线菊3种灌丛20~40 cm土层土壤容重大于40~60 cm，这可能与植株根系分布密度格局有关，不同土层间、不同灌丛间容重差异显著($P<0.05$)。总孔隙度变化趋势与土壤容重相反，也就是随着土层深度的增加，孔隙度逐渐减小，但阳坡山生柳、硬叶柳、绣线菊40~60 cm土层总孔隙高于20~40 cm，两土层间差异均不显著($P>0.05$)，千里香杜鹃10~20 cm总孔隙度高于0~10 cm，两土层间差异不显著($P>0.05$)。

3.2.2 土壤持水能力 土壤的容重、孔隙度影响着土壤的持水能力，土壤疏松、孔隙度大，水分能较长时间的留在土壤中。由表3可知，以每10 cm土壤厚度来看，千里香杜鹃灌丛土壤的最大持水量、毛管持水量均最大，分别为687.46 t·hm^{-2}、640.11 t·hm^{-2}。千里香杜鹃、头花杜鹃、金露梅土壤的最大持水量、毛管持水量均显著高于山生柳、硬叶柳、绣线菊3种灌丛($P<0.05$)，土壤的最大持水量依次为千里香杜鹃(687.46 t·hm^{-2})>头花杜鹃(686.08 t·hm^{-2})>金露梅(666.62 t·hm^{-2})>硬叶柳(623.36 t·hm^{-2})>山生柳(622.79 t·hm^{-2})>绣线菊(609.44 t·hm^{-2})，毛管持水

表3 灌丛土壤物理性质和水文特征

Tab. 3 Soil physical properties and hydrological characteristics of shrubland

灌丛类型	土层深度/cm	容重/g·cm^{-3}	非毛管孔隙/%	毛管孔隙/%	总孔隙/%	最大持水量/t·hm^{-2}	毛管持水量/t·hm^{-2}	最小持水量/t·hm^{-2}
山生柳	0~10	0.78±0.06Ca	6.34±0.90Aab	64.30±3.12Ab	70.64±3.65Ab	706.40±36.48Ab	642.96±31.18Ab	63.43±9.02Aab
	10~20	0.81±0.07Ca	4.29±1.46Bab	63.47±2.19Abcd	67.76±3.33Ab	677.57±33.33Ab	634.70±21.93Abcd	42.87±14.64Bab
	20~40	1.17±0.04Aa	2.63±0.33Bb	50.93±1.24Bb	53.56±1.46Bb	535.55±14.58Bb	509.29±12.39Bb	26.27±3.30Bb
	40~60	1.03±0.00Bab	3.55±0.68Bb	53.61±0.26Bab	57.16±0.94Ba	571.63±9.40Ba	536.13±2.60Bab	35.50±6.80Bb
	均值	0.95±0.03a	4.20±0.16a	58.08±0.17b	62.28±0.21b	622.79±2.09b	580.77±1.68b	42.02±1.65a
硬叶柳	0~10	0.79±0.02Da	5.65±1.95Aab	64.64±0.18Ab	70.28±1.92Ab	702.82±19.17Ab	646.35±1.76Ab	56.47±19.53Aab
	10~20	0.87±0.04Ca	6.06±1.70Aab	59.04±2.01Bd	65.10±1.65Bbc	651.05±16.52Bbc	590.41±20.10Bd	60.63±17.02Aab
	20~40	1.10±0.06Ab	3.73±0.73Aa	51.39±2.33Cb	55.12±1.64Cb	551.16±16.41Db	513.90±23.26Cb	37.27±7.34Aa
	40~60	0.99±0.02Bbc	5.39±1.65Aab	53.45±0.79Cab	58.84±2.44Ca	588.42±24.42Ca	534.52±7.92Cab	53.90±16.50Aab
	均值	0.94±0.02a	5.21±1.10a	57.13±1.20b	62.34±1.31b	623.36±13.07b	571.30±12.00b	52.07±10.99a
绣线菊	0~10	0.78±0.15Ca	5.90±2.42Aab	65.90±2.53Ab	71.80±4.30Ab	718.00±43.02Ab	658.97±25.31Ab	59.03±24.23Aab
	10~20	0.86±0.06BCa	3.21±0.32Bb	60.50±0.50Bcd	63.71±0.56Bc	637.14±5.63Bc	605.04±5.02Bcd	32.10±3.21Bb
	20~40	1.07±0.01Ab	3.11±0.27Bab	49.63±0.47Cb	52.74±0.20Cb	527.39±2.00Cb	496.34±4.75Cb	31.05±2.75Bab
	40~60	0.96±0.00ABc	7.53±0.13Aa	47.99±1.19Cc	55.52±1.32Ca	555.21±13.23Ca	479.91±11.93Cc	75.30±1.30Aa
	均值	0.92±0.05a	4.94±0.46a	56.01±0.50b	60.94±0.78b	609.44±7.81b	560.07±5.02b	49.37±4.63a
头花杜鹃	0~10	0.48±0.03Db	5.81±0.23ABab	73.11±0.79Aa	78.92±1.02Aa	789.16±10.20Aa	731.06±7.90Aa	58.10±2.30ABab
	10~20	0.65±0.09Cb	4.78±0.79ABab	68.32±2.50Aab	73.10±1.71Aa	731.05±17.14Aa	683.25±25.02Aab	47.80±7.90ABab
	20~40	0.84±0.02Bd	3.47±0.07Bab	61.31±5.13a	64.77±5.07Ba	647.72±50.68Ba	613.07±51.33Ba	34.65±0.65Bab
	40~60	1.05±0.05Aa	6.74±2.46Aa	50.89±3.02Cb	57.64±5.48Ba	576.38±54.84Ba	508.93±30.19Cb	67.45±24.65Aa
	均值	0.76±0.00c	5.20±0.89a	63.41±0.96a	68.61±0.07a	686.08±0.69a	634.08±9.56a	52.00±8.87a
千里香杜鹃	0~10	0.53±0.02Cb	7.51±1.06Aa	66.53±2.58Bb	74.03±1.52Aab	740.31±15.19Aab	665.26±25.84Bb	75.05±10.65Aa
	10~20	0.54±0.06Cb	5.04±0.12Bab	70.76±1.95Aa	75.80±2.07Aa	757.98±20.70Aa	707.63±19.55Aa	50.35±1.15Bab
	20~40	0.72±0.01Be	3.35±0.25Cab	65.19±1.82Ba	68.53±2.07Ba	685.32±20.66Ba	651.87±18.21Ba	33.45±2.45Cab
	40~60	0.98±0.01Ac	3.05±0.55Cb	53.57±1.12Cab	56.62±0.58Ca	566.23±5.75Ca	535.68±11.20Cab	30.55±5.45Cb
	均值	0.69±0.02d	4.74±0.49a	64.01±0.02a	68.75±0.51a	687.46±5.10a	640.11±0.21a	47.35±4.93a
金露梅	0~10	0.68±0.04Ca	4.22±0.15Bb	68.75±2.93Ab	72.97±3.08Ab	729.68±30.80Ab	687.53±29.35Ab	42.15±1.45Bb
	10~20	0.79±0.09Ba	7.11±2.80Aa	65.39±5.18Abc	72.49±2.37Aa	724.93±23.73Aa	653.88±51.78Abc	71.05±28.05Aa
	20~40	0.95±0.04Ac	2.94±0.81Bab	61.28±5.28ABa	64.23±4.46Ba	642.29±44.64Ba	612.84±52.79ABa	29.45±8.15Bab
	40~60	1.03±0.01Aab	3.08±0.26Bb	53.88±0.18Ba	56.96±0.44Ca	569.60±4.44Ca	538.80±1.84Ba	30.80±2.60Bb
	均值	0.86±0.01b	4.34±0.93a	62.33±3.30a	66.66±2.37a	666.62±23.68a	623.26±33.02a	43.36±9.34a

注：不同大写字母表示同一灌丛、不同土层间的差异性显著($P<0.05$)，不同小写字母表示同一土层不同灌丛间差异性显著($P<0.05$)。

量依次为千里香杜鹃(640.11 t·hm^{-2})>头花杜鹃(634.08 t·hm^{-2})>金露梅(623.26 t·hm^{-2})>山生柳(580.77 t·hm^{-2})>硬叶柳(571.30 t·hm^{-2})>绣线菊(560.07 t·hm^{-2})。6种灌丛土壤最小持水量变化趋势和土壤非毛管孔隙度一致,依次为硬叶柳(52.07 t·hm^{-2})>头花杜鹃(52.00 t·hm^{-2})>绣线菊(49.37 t·hm^{-2})>千里香杜鹃(47.35 t·hm^{-2})>金露梅(43.36 t·hm^{-2})>山生柳(42.02 t·hm^{-2}),6种灌丛间均无显著差异(P>0.05)。从土壤的垂直剖面来看,土壤的最大持水量、毛管持水量、最小持水量均随着土层深度的增加而减小,但阳坡山生柳、硬叶柳、绣线菊40~60 cm土层高于20~40 cm,两土层之间差异不显著(P>0.05),千里香杜鹃的最大持水量、毛管持水量10~20 cm高于0~10 cm。总体来看,阴坡土壤的性状优于阳坡,这可能与阴坡灌丛枯落物下方的苔藓层和水热条件有关。

3.3 不同灌丛水源涵养功能

本文采用坐标综合评定法,把不同的量纲归一化,得出综合评价的结果。从表4可以看出,山生柳灌丛的枯落物蓄积量、持水量、拦蓄量均为最优,土壤蓄水能力最低,硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃的土壤蓄水能力相对较好。由综合排序结果可以看出,水源涵养功能最强的是山生柳灌丛(0.0376),比其他灌丛低0.7~3.5个数量级,其次分别是硬叶柳(0.7385)、金露梅(2.3471)、绣线菊(2.5302)、头花杜鹃(3.2114)、千里香杜鹃(3.4583)。

表4 灌丛水源涵养功能指标及排序

Tab. 4 Indices and rankings of shrub water conservation function

灌丛类型	枯落物厚度		枯落物蓄积量		枯落物最大持水量		枯落物有效拦蓄量		土壤蓄水能力		综合能力	
	P_1^2	序次	P_2^2	序次	P_3^2	序次	P_4^2	序次	P_5^2	序次	$\sum P_i^2$	序次
山生柳	0.0000	1	0.0000	1	0.0000	1	0.0000	1	0.0376	6	0.0376	1
硬叶柳	0.1595	2	0.1796	2	0.1987	2	0.2007	2	0.0000	1	0.7385	2
绣线菊	0.6238	5	0.5930	3	0.6952	4	0.6154	4	0.0027	3	2.5302	4
头花杜鹃	0.6003	4	0.8105	5	0.8529	5	0.9478	6	0.000003	2	3.2114	5
千里香杜鹃	0.7742	6	0.8766	6	0.8952	6	0.9041	5	0.0081	4	3.4583	6
金露梅	0.4485	3	0.6320	4	0.6641	3	0.5746	3	0.0279	5	2.3471	3

4 讨 论

4.1 枯落物的蓄积量

枯落物蓄积量的大小受枯落物树种、林龄、郁闭度、当地环境、人为活动、林分密度、坡向等多种因素的影响[8,26]。本研究中6种灌丛枯落物蓄积量的范围为0.23~3.61 t·hm^{-2}。蓄积量值低于赵锦梅等[27]2014年在祁连山的研究,可能是因为近年来,该地区冬季放牧等人为活动的影响,使得灌丛叶片、枝条、枯落物减少,进而影响了枯落物的蓄积。6种灌丛枯落物蓄积量阳坡灌丛高于阴坡,与牛勇等[26]的研究一致,这是因为阳坡光照强、枯落物及土壤的湿度相对于阴坡小,有利于枯落物的积累,研究区山生柳、硬叶柳的郁闭度相对较大,其冠幅、高度均大于其余灌丛,林冠层遮盖了大部分的光照,导致灌丛本身下层的枝条和草本植物缺乏充足的光照死亡,使其分解速度减缓[28],因此山生柳灌丛的蓄积量最大、硬叶柳其次。绣线菊、金露梅等的冠幅较小,产生的枯枝落叶较少,蓄积量小于山生柳与硬叶柳,头花杜鹃和千里香杜鹃为常绿小灌木,所以枯落物蓄积量值远低于山生柳、硬叶柳、绣线菊、金露梅4种落叶灌丛枯落物。

4.2 枯落物持水与拦蓄性能

枯落物的持水量与蓄积量、分解程度、枯落物组成[29]等有关,6种灌丛枯落物最大持水量从大到小依次为山生柳、硬叶柳、金露梅、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃,最大持水量与蓄积量呈正相关关系,与已有研究结果相似[1],但是金露梅和绣线菊的蓄积量和最大持水量恰好相反,分析认为,枯落物的主要成分为叶片和少量枝条,金露梅的叶片轻,但是叶柄和花梗有绢毛或长柔毛,增加了和水分的接触面积,有助于叶片吸水[30],导致了金露梅的蓄积量小于绣线菊,最大持水量大于绣线菊。本研究中发现,枯落物的持水量与浸水时间符合对数函数关系,吸水速率与浸水时间符合幂函数关系。这与

众多学者[17,31-32]的研究结论一致。

根据枯落物拦蓄性能的计算可知，枯落物的拦蓄量与植物自身吸水能力、自然含水率、最大持水率、蓄积量等息息相关。本研究中，6种灌丛的最大拦蓄量和有效拦蓄量均为山生柳>硬叶柳>金露梅>绣线菊>千里香杜鹃>头花杜鹃，与最大持水量的变化趋势一致，说明枯落物的拦蓄量与最大持水量之间存在正相关。最大拦蓄率和有效拦蓄率从大到小依次为金露梅、山生柳、硬叶柳、绣线菊、千里香杜鹃、头花杜鹃。有效拦蓄量和有效拦蓄率的变化趋势略有差异，因为金露梅的最大持水率较大，自然含水率较小，致使其最大拦蓄率和有效拦蓄率最大。而拦蓄量还与蓄积量相关。金露梅的蓄积量较小，所以金露梅的最大拦蓄量和有效拦蓄量低于山生柳和硬叶柳，而拦蓄率高于山生柳和硬叶柳。

4.3 土壤的水文特征

土壤持水能力是评价森林水源涵养功能的重要指标[29]，受到土壤孔隙度、土壤容重、土壤粒径、土壤结构和实际表面积等综合因素的影响[1]，容重和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数。本研究中，各灌丛土壤的容重与最大持水量呈负相关，容重的高低决定了土壤总孔隙度的多少，进而影响了土壤的持水量，容重越小，土壤越疏松，结构稳定，总孔隙度占比越高，土壤持水能力越高，越有利于拦蓄降水，容重越大则反之。千里香杜鹃灌丛土壤的容重最小，总孔隙度最高，因此千里香杜鹃灌丛的土壤性状最好。从整体来看，阴坡头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅3种灌丛下土壤的性状优于阳坡土壤，持水量也高于阳坡。一方面这可能是因为灌丛由于其生物学特性的差异，对土壤理化性质的影响不一致，进而影响了土壤的蓄水功能[1]；另一方面阴坡灌丛枯落物下方具有一定量的苔藓，阴坡的低温、弱光照，较小的灌丛郁闭度，使得苔藓具有较高的光合速率，致使生长良好[33-34]，具有很强的吸水保水能力，增加了土壤的持水性能。从各灌丛土壤的垂直剖面看，阳坡山生柳、硬叶柳、绣线菊3种灌丛20~40 cm土层的容重大于40~60 cm土层，这与赵锦梅等[27]在2014年对于阳坡柳灌丛的研究结论一致，土壤总孔隙度、持水量变化和容重恰好相反，从大到小依次为0~10 cm、10~20 cm、40~60 cm、20~40 cm，这可能是因为阳坡灌丛冠幅高度较大，根系发达且延伸至深层，土壤动物活动频繁，孔隙度高，所以40~60 cm土层较20~40 cm土层疏松[35]。千里香杜鹃灌丛土壤10~20 cm总孔隙度、持水量均高于0~10 cm，这可能是因为10~20 cm是千里香杜鹃活根比值最高、同时也是粗根比例较高的土层[36]，土壤空隙较大，因此能够储存较多的水分。

4.4 水源涵养功能综合评价

从水源涵养功能综合分析来看，山生柳灌丛的水源涵养功能明显高于其余5种灌丛，随之依次为硬叶柳、金露梅、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃。山生柳具有较高水源涵养功能源自于其较大的林冠层具有减弱雨滴降落速度及较强降雨截留能力、地表枯落物的大量蓄积具有减缓林分穿透雨冲刷地表及减少土壤表面水分蒸发作用，而有研究发现[37]绣线菊灌丛的截留量最高，随之依次为硬叶柳、山生柳、头花杜鹃、金露梅，千里香。由此可以看出，枯落物的蓄积在水源涵养功能中起着至关重要的作用。

5 结 论

通过对祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水文特征的研究，得出以下主要结论：

（1）山生柳灌丛的蓄积量、最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量均优于硬叶柳、绣线菊、头花杜鹃、千里香杜鹃、金露梅5种灌丛。千里香杜鹃灌丛土壤的容重最小，总孔隙度、最大持水量最大，土壤性状相对最优。

（2）采用坐标综合评定法对不同灌丛的水源涵养功能进行了综合评价，得到水源涵养功能最好的灌丛是山生柳(0.0376)，其次为硬叶柳(0.7385)、金露梅(2.3471)、绣线菊(2.5302)、头花杜鹃(3.2114)、千里香杜鹃(3.4583)。

（3）综上，在今后祁连山森林经营活动中，应当加强对灌丛枯落物的保护与监管力度，调整放牧的频次与频率，同时应在考虑当地地理位置、水热条件、放牧情况下，充分利用不同灌丛枯落物和土壤水文功能的差异，适当的增加山生柳树种，以提升该地区灌丛的持水能力，更大限度的发挥灌丛涵养水源的功能，为青藏高原东北部乃至整个河西绿洲的水分循环及生态安全发挥作用。但是，由于水源涵养功能受到林冠层、枯落物层、土壤层等众多因素的影响，文中仅对枯落物层和土壤层进行了研

究，后续需要对林冠层、苔藓层、土壤的渗透性、抗蚀抗冲刷、枯落物分解等综合进行研究评价，以便能更好的解释灌丛水源涵养功能的机制。

参考文献(References)

[1] 杨益帆, 胡宗达, 李亚非, 等. 川西亚高山川滇高山栎灌丛地被物与土壤持水性能[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 951–960. [Yang Yifan, Hu Zongda, Li Yafei, et al. Water conservation capacity of ground cover and soils in the subalpine *Quercus aquifolioides* shrubs of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(4): 951–960.]

[2] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019–1030. [Wang Xiaoxue, Shen Huitao, Li Xuyong, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1019–1030.]

[3] 王玲, 赵广亮, 周红娟, 等. 八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1767–1775. [Wang Ling, Zhao Guangliang, Zhou Hongjuan, et al. Hydrological characteristics of litter in a *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in Badaling Forest Farm[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9): 1767–1775.]

[4] Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. Catena, 2013, 108: 50–57.

[5] 陈波, 杨新兵, 赵心苗, 等. 冀北山地6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 196–202. [Chen Bo, Yang Xinbing, Zhao Xinmiao, et al. Hydrological effects of six natural pure forests litters and soil in northern mountain of Hebei Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 196–202.]

[6] 魏强, 凌雷, 张广忠, 等. 甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2589–2598. [Wei Qiang, Ling Lei, Zhang Guangzhong, et al. Water-holding characteristics and accumulation amount of the litters under main forest types in Xinglong Mountain of Gansu, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2589–2598.]

[7] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3807–3819. [Li Qiang, Zhou Daowei, Chen Xiaoying. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3807–3819.]

[8] 赵鹏, 马佳明, 李艳茹, 等. 太行山典型区域不同林分类型枯落物水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 176–185. [Zhao Peng, Ma Jiaming, Li Yanru, et al. Hydrological effects of litters in different forest types in the typical areas of Taihang Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 176–185.]

[9] Gabarrón-Galeote M A, Martínez-Murillo J F, Ruiz-Sinoga J D, et al. Relevant effects of vegetal cover and litter on the soil hydrological response of two contrasting Mediterranean hillslopes at the end of the dry season (south of Spain) [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(11): 1729–1738.

[10] Ent R J V D, Coenders-Gerrits A M J, Nikoli R, et al. The importance of proper hydrology in the forest cover-water yield debate: Commentary on Ellison et al. (2012) Global Change Biology, 18, 806–820[J]. Global Change Biology, 2012, 18(9): 2677–2680.

[11] Christopher, Burrows R, Martin, et al. Hydrology of the forest city basin, mid-continent, USA: Implications for CO_2 sequestration in the St. Peter Sandstone[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73 (4): 1409–1425.

[12] 燕东. 海南尖峰岭热带雨林凋落物和土壤水文特性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011. [Yan Dong. Study on hydrological characteristics of litter and soil in tropical rainforest in Jianfengling, Hainan Island[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.]

[13] 刘佳茹, 赵军, 沈思民, 等. 基于SRP概念模型的祁连山地区生态脆弱性评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1573–1582. [Liu Jiaru, Zhao jun, Shen Simin, et al. Ecological vulnerability assessment of Qilian Mountains region based on SRP conceptual model [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1573–1582.]

[14] 袁杰, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J]. 生态科学, 2018, 37(5): 180–190. [Yuan Jie, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Analysis on litterfall and soil water retention properties of different vegetation types on the south slope of Qilian Mountains[J]. Ecological Science, 2018, 37(5): 180–190.]

[15] 赵维俊. 祁连山水源涵养林水文特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008. [Zhao Weijun. Study on the hydrological characteristics of water conservation forest in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.]

[16] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 等. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 62–72. [Tian Fengxia, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (4): 62–72.]

[17] 张学龙, 金铭, 刘贤德, 等. 祁连山5种典型灌木林枯落物蓄积量及其持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 735–740. [Zhang Xuelong, Jin Ming, Liu Xiande, et al. Litter storage and its water holding capacity characteristics of five typical shrubs in Qilian Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24 (5): 735–740.]

[18] 常宗强, 王金叶, 常学向, 等. 祁连山水源涵养林枯枝落叶层水文生态功能[J]. 西北林学院学报, 2001(增刊1): 8–13. [Chang Zongqiang, Wang Jinye, Chang Xuexiang, et al. Litter hydrology and ecological functions of water resource conservation forest in Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,

2001(Suppl. 1): 8-13.]
[19] 聂雪花, 车克钧, 刘贤德, 等. 祁连山西水林区主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(15): 7269-7272. [Nie Xuehua, Che Kejun, Liu Xiande, et al. Study on the main forest type soil hydrological function in Xishui forest region of Qilian Mountain[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37 (15): 7269-7272.]
[20] 赵锦梅, 王彦辉, 王紫, 等. 祁连山东段金强河河谷高寒草地土壤的水文特征[J]. 草业科学, 2020, 37(2): 256-265. [Zhao Jinmei, Wang Yanhui, Wang Zi, et al. Soil hydrological characteristics of alpine grasslands in the Jinqiang River Valley in eastern Qilian Mountains[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(2): 256-265.]
[21] 王金叶. 祁连山水源涵养林生态系统水分传输过程与机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2006. [Wang Jinye. Study of mechanism and process of water transmission on water resoure conservation forests eeosystem in Qilian Mountains[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2006.]
[22] 孟好军, 刘贤德, 张宏斌, 等. 祁连山人工林凋落物和土壤水分特性的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 11-15. [Meng Haojun, Liu Xiande, Zhang Hongbin, et al. Study on litters and soil moisture characteristics of different plantations in Qilian Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(2): 11-15.]
[23] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1033-1040. [Ma Jian, Liu Xiande, Li Guang, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1033-1040.]
[24] 王学福. 灌木林在祁连山区的作用及其发展策略研究[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 32-35, 57. [Wang Xuefu. The importance of shrub in Qilian Mountain and its protection and development countermeasures[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2005, 30(2): 32-35, 57.]
[25] 陈引珍, 程金花, 张洪江, 等. 缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 66-70. [Chen Yinzhen, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Evaluation of soil and water conservation capacity of several forest in Jinyun Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 66-70.]
[26] 牛勇, 刘洪禄, 张志强. 北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 183-189. [Niu Yong, Liu Honglu, Zhang Zhiqiang. Effects of typical tree species and abiotic factors on hydrologic characters of forest litter in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 183-189.]
[27] 赵锦梅, 徐长林, 马亚萍, 等. 祁连山东段高寒灌丛地被物与土壤的水文特征[J]. 林业科学, 2014, 50(10): 146-151. [Zhao Jinmei, Xu Changlin, Ma Yaping, et al. Surface cover and soil hydrological characteristics of alpine shrub in eastern Qilian Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(10): 146-151.]
[28] 齐瑞, 杨永红, 陈宁, 等. 白龙江上游5种典型灌木林枯落物蓄积量及持水特性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 123-127. [Qi Rui, Yang Yonghong, Chen Ning, et al. Litter storage and water holding capacity characteristics of five typical shrubberies in the upper reaches of Bailongjiang River of Gansu Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 123-127.]
[29] 林立文, 邓羽松, 李佩琦, 等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 200-207, 215. [Lin Liwen, Deng Yusong, Li Peiqi, et al. Study on the effects of litter and soil hydrology of different density *Cunninghamia lanceolata* forests in northern Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 200-207, 215.]
[30] 李晶晶, 白岗栓, 张蕊. 陕北丘陵沟壑区常见树种叶片的吸水性能[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 99-102. [Li Jingjing, Bai Gangshuan, Zhang Rui. Water absorption of common trees leaves in loess hilly and gully region of northern Shaanxi[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 99-102.]
[31] 吴晓光, 刘龙, 张宏飞, 等. 砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 137-144. [Wu Xiaoguang, Liu Long, Zhang Hongfei, et al. Litter water-holding capacity and soil physical properties of main afforestation tree species in sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 137-144.]
[32] 梁晓娇, 王树力. 阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 140-145, 152. [Liang Xiaojiao, Wang Shuli. Litter and soil hydrological properties of *Pinus koraiensis* plantations in Ashi River's headstream [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 140-145, 152.]
[33] Hobbie S E, Shevtsova A, Chapin F S. Plant responses to species removal and experimental warming in Alaskan tussock tundra[J]. Oikos, 1999, 84(3): 417-434.
[34] Waite M, Sack L. How does moss photosynthesis relate to leaf and canopy structure? Trait relationships for 10 Hawaiian species of contrasting light habitats[J]. New Phytologist, 2010, 185(1): 156-172.
[35] 吕宸, 宫渊波, 龚伟, 等. 川西高寒山地灌丛草甸土壤水文效应特征[J/OL]. 应用与环境生物学报. [2021-04-13]. https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020. 04029. [Lü Chen, Gong Yuanbo, Gong Wei, et al. Characteristics of soil hydrological effects of alpine shrub meadow in western Sichuan[J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology. [2021-04-13]. https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2020. 04029.]
[36] 曹文侠, 李文. 千里香杜鹃根系生物量时空动态特征及其生态适应性[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 52-61. [Cao Wenxia, Li Wen. Spatio-temporal trends for fine root biomass of alpine *Rhododendron thymifolium* and their significance for ecological adaptation in Qilian Mountains[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(7):

52−61.]
[37] 张雪, 赵锦梅, 雷隆举, 等. 祁连山东段六种灌丛降雨再分配特征[J]. 中国草地学报, 2021, 43(1): 83−89. [Zhang Xue, Zhao Jinmei, Lei Longju, et al. Characteristics of rainfall redistribution of six shrubs in eastern Qilian Mountain[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(1): 83−89.]

Litter and soil water conservation function of typical shrubs in eastern Qilian Mountains

YANG Xiaoxia, ZHAO Jinmei, ZHANG Xue, FAN Yuhang, ZHANG Bin, WANG Jingnan, ZHANG Biyan

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The water conservation function of the Qilian Mountains plays a vital role in the social, economic, and ecological security of the northeast part of the Qinghai-Tibet Plateau and even the whole Hexi Oasis. To investigate the water conservation function of the shrub litter layer and shrub soil layer in this area, to clarify the difference in water conservation effect of different shrub forests, and to provide theoretical guidance for the restoration and improvement of the water conservation function of shrubs and the vegetation construction in the Qilian Mountains' alpine region. Taking litter and soil of six typical shrubs in the eastern part of Qilian Mountains as research objects, the hydrological characteristics of litter were studied by field investigation and indoor immersion, The cutting ring method was used to investigate the physical properties of soil, while the coordinate comprehensive evaluation method was used to assess the water conservation function of shrub litter and soil. The outcomes are as follows: (1) The accumulation of litter of the six shrubs ranged from 0.23−3.61 $t\cdot hm^{-2}$, and the order of size was as follows: *Salix oritrepha*>*Salix sclerophylla*>*Spiraea salicifolia*>*Potentilla fruticosa*>*Rhododendron capitatum*>*Rhododendron thymifolium*. (2) The maximum water holding the capacity range of litter is 0.57−10.59 $t\cdot hm^{-2}$, with the largest *S. oritrepha* and the smallest *R. thymifolium*. The maximum water holding rate ranged from 147.30% to 293.28%, with the largest variation being *S. oritrepha* and the smallest *S. salicifolia.* (3) The water holding capacity (Y) and soaking time (t) of the six shrubs are in a logarithmic function relationship: $Y=k\ln t+b$, $R^2>0.967$, and the water absorption rate (V) and soaking time (t) is in a power function relationship: $V=Kt^n$, $R^2>0.823$. (4) The maximum storage capacity and the effective storage capacity were all *S. oritrepha*>*S. sclerophylla*>as *P. fruticosa*>*S. salicifolia*>*R. thymifolium*>*R. capitatum*. The maximum, and effective interception rates were calculated as *P. fruticosa*>*S. oritrepha*>*S. sclerophylla*>*S. salicifolia*>*R. thymifolium*>*R. capitatum*. (5) The soil bulk density of the six types of shrubs ranges from 0.69−0.95 $g\cdot cm^{-3}$, with *S. oritrepha* being the largest and *R. thymifolium* being the smallest. The total porosity of the soil ranges from 60.94%−68.75%. *R. thymifolium* is the largest, and *S. salicifolia* is the smallest. The maximum water holding capacity of the soil ranges from 609.44−687.46 $t\cdot hm^{-2}$, *R. thymifolium* is the largest, and *S. salicifolia* is the smallest. (6) The litter layer and soil layer's water conservation function *S. oritrepha* is the best according to the analysis of coordinate comprehensive evaluation method, next were the *S. sclerophylla* (0.7385), *P. fruticosa* (2.3471), *S. salicifolia* (2.5302), *R. capitatum* (3.2114) and *R. thymifolium* (3.4583). To summarize, we should strengthen shrub litter protection and supervision, take full advantage of the differences in hydrological functions between different shrub litter and soil, and appropriately increase the species of shrub litter *S. oritrepha*, and give full play to the function of a shrub to conserve water resources.

Key words: shrub; litter; soil; hydrological characteristics; alpine region